راهنمای تنظیم پیشروی و سرعت
در فرز سی‌ان‌سی

گزینش و ترجمهٔ نوید قیداری

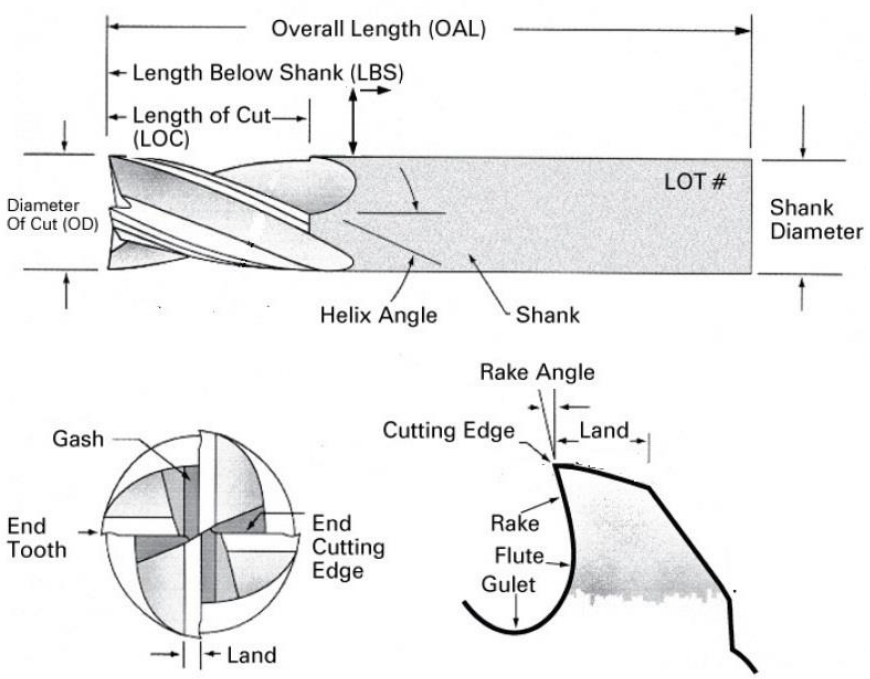
بخش عمدهٔ مطالب این کتاب برگرفته از مقالات «cnccookbook.com» است که با مطالبی از سایت‌های دیگر تکمیل شده.

فهرست مطالب

آناتومی فرز 1
مفاهیم پایه 7
ضخامت سفاله و سرعت محیطی 13
محاسبهٔ پیشروی و سرعت 21
اهمیت خنک‌کاری و برداشتن سفاله‌ها 31
کنترل کردن خمیدگی ابزار 39
ضروریات مسیر ابزار در ماشین‌کاری فوق‌سریع 45

آناتومی فرز

قبل از هر بحثی راجع به پیشروی و سرعت باید به شناخت نسبتاً کاملی از ساختار فرزها برسیم تا بتوانیم برای هر عملیات ماشین‌کاری خاص فرز مناسب‌اش را انتخاب کنیم. این مساله نقش مهمی در دستیابی به نتیجهٔ مطلوب ایفا می‌کند. در شکل زیر آناتومی یک فرز چهارپر «Endmill» را می‌بینید که می‌تواند به عنوان مرجعی برای شناخت سایر فرزها مورد استفاده قرار بگیرد.



ساق (shank): بخش انتهایی فرز که داخل فشنگی می‌نشیند.

پیشانی (face): پیشینی‌ترین سطح فرز که مقطع دایره‌ای دارد.

پره (tooth): برجستگی‌های تیزی که دور تا دور فرز را فرا گرفته‌اند.

لبهٔ برنده (cutting edge): لبهٔ تیز پره‌ها. محل تقاطع دو سطح عمودی و افقی هر پره با زاویهٔ زیر 90 درجه.

شیاره (flute): فاصلهٔ خالی میان پره‌ها. با افزایش اندازهٔ شیاره خروج سفاله‌ها آسان‌تر می‌شود.

مغزی (core/fillet): استوانهٔ داخلی فرز تا قبل از شروع شیارها.

قطر فرز (diameter of cutting): قطر پیشانی فرز.

ارتفاع لبه (tool hight): اختلاف قطر فرز و قطر مغزی. هر چه ارتفاع لبه بیشتر باشد می‌تواند سفاله‌های ضخیم‌تری بردارد.

طول پره (flute length): طول قسمتی از فرز که شیارهای لبه‌دار دارد. طول برش برابر با طول پره است.

گلو (gullet): منحنی مقعر در بخش تحتانی شیاره که باعث می‌شود سفاله تاب بخورد و از لای برش بیرون بیاید. افزایش قطر گلو سبب تسهیل خروج سفاله می‌شود.

چنگک (rake): سطح زاویه‌دار یا قوس‌دار زیر لبهٔ برنده. لبهٔ تیز زاویه‌داری که به سطح بیرونی فرز متصل است.

چنگک منفی (negative rake) وقتی ایجاد می‌شود که نخستین نقطهٔ تماس ابزار و قطعهٔ کار جایی غیر از لبهٔ برنده باشد. این کار باعث بروز سایش و خرابی فرز می‌شود.

چنگک مثبت (positive rake) وقتی ایجاد می‌شود که نخستین تماس ابزار و قطعهٔ کار روی لبهٔ برنده باشد.

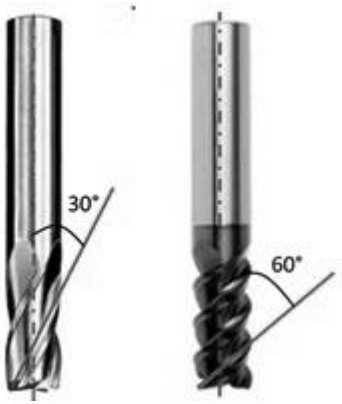
زاویهٔ چنگک (rake angle): زاویهٔ میان چنگک (یا خط مماس بر لبهٔ چنگک) و قطر فرز. در حالت چنگک مثبت این زاویه مهم‌ترین نقش را در تشکیل سفاله‌ها ایفا می‌کند؛ مخصوصاً اگر فقط لبهٔ فرز با قطعهٔ کار درگیر شود. هر چه زاویهٔ چنگک بازتر باشد می‌توان سفاله‌های کوچک‌تری برداشت.

فرجه (gash): برش اضافی در پیشانی فرز به‌منظور ایجاد فضا برای خروج سفاله. هر چه زاویهٔ فرجه (تورفتگی فرجه) بیشتر باشد خروج سفاله‌ها آسان‌تر خواهد شد.

پشته (land): بخشی از سطح بیرونی فرز که به لبهٔ برنده می‌رسد و به منظور جلوگیری از ساییدگی دارای تورفتگی با زاویه‌ای ملایم است.

معمولاً پشته از 2 یا 3 سطح زاویه‌دار غیرهم‌مرکز شکل می‌گیرد. به طوری که بیرونی‌ترین سطح دارای زاویهٔ خیلی کمی است تا تیزی لبهٔ برنده افزایش یابد. زاویهٔ سطوح بعدی اندک اندک افزایش می‌یابد.

زاویهٔ مارپیچ (helix angle): زاویهٔ میان خط مماس بر پشته و خط محور فرز.



دو فرز بالا علی‌رغم قطر یکسان و طول برش یکسان و تعداد پره‌های یکسان کارکرد کاملاً متفاوتی دارند. زیرا زاویهٔ مارپیچ آن‌ها کاملاً متفاوت است: یکی زیر 40 درجه (مارپیچ باز) و دیگری بالای 40 درجه (مارپیچ بسته) است.

به طور کلی هر چه زاویهٔ مارپیچ بیشتر شود قدرت و کیفیت حرکت افقی ابزار افزایش می‌یابد ولی قدرت و کیفیت برش‌های عمودی آن کمتر می‌شود. بنابراین مارپیچ‌های باز برای نفوذ عمود مناسب‌ترند در حالی که مارپیچ‌های بسته به درد نفوذ از کناره‌ها می‌خورند. همچنین هر چه زاویهٔ مارپیچ بیشتر باشد زاویهٔ چنگک بزرگ‌تر می‌شود و تیزی و برندگی پره‌ها افزایش می‌یابد. به همین دلیل ابزارهای مارپیچ باز اگر اندکی کند شوند عملاً از کار می‌افتند ولی به دلیل وجود زاویهٔ چنگک مطلوب در ابزارهای مارپیچ بسته می‌توان با کند شدن نسبی آن‌ها کنار آمد. مطلب دیگر اینکه ضخامت سفاله‌ها در ابزارهای مارپیچ باز بیشتر است و این وضع به درد خشن‌کاری می‌خورد. در سمت مقابل ابزارهای مارپیچ بسته به درد پرداخت سطح می‌خورند. البته در پرداخت سطوح فلات بهتر است از زاویهٔ مارپیچ 40 الی 45 درجه استفاده کرد و به سراغ زوایای خیلی باز و خیلی بسته نرفت.

با توجه به بحث فوق می‌توان فرزها را بسته به زاویهٔ مارپیچ در چند دسته رده‌بندی کرد:

زاویهٔ مارپیچ صفر تا 30 درجه: فقط مناسب موادی که سفاله‌های بسیار ریزی دارند مانند پلاستیک‌ها و مس و برنج و برنز. همچنین مناسب قطعه‌هایی که خطر قلاب کردن‌شان خیلی بالاست.

زاویهٔ 30 درجه: ایدئال برای ماشین‌کاری چدن و خشن‌کاری آهن.

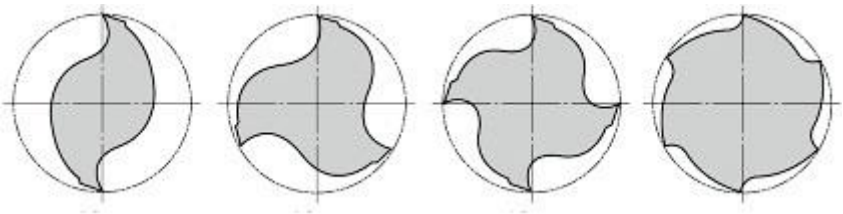
زاویهٔ 30 تا 40 درجه: مناسب برای ماشین‌کاری آهن و فولاد و استیل ضدزنگ و آلیاژهای سخت.

زاویهٔ 40 تا 45 درجه: مناسب برای ماشین‌کاری فلزات غیرآهنی مانند آلومنیوم و مس.

زاویهٔ 45 تا 60 درجه: ایدئال برای پرداخت نهایی سطوح.

در سال‌های اخیر فرزهایی به بازار آمده‌اند که در نقاط مختلف‌شان زوایای مارپیچ متغیر دارند. این طراحی خاص به گونه‌ای است که قدرت و استحکام و تیزی فرز را افزایش می‌دهد. فرزهای مارپیچ متغیر مناسب‌ترین انتخاب برای ماشین‌کاری استیل ضدزنگ و سایر آلیاژهای سخت هستند.

به عنوان آخرین بحث آناتومی به سراغ تعداد پره‌ها می‌رویم. با توجه به شکل زیر می‌توانید اهمیت این مبحث را به سادگی دریابید: هرچه تعداد پره‌ها افزایش یابد قطر مغزی بزرگ‌تر شده و بالتبع ارتفاع لبه کمتر می‌شود.



با توجه به ارتفاع لبه می‌توان گفت هر چه تعداد پره کمتر باشد ضخامت سفاله افزایش می‌یابد و بالعکس. پس فرزهای کم‌پر اولاً به درد خشن‌کاری می‌خورند و ثانیاً مناسب آن دسته از موادند که گرایش به ایجاد سفاله‌های بزرگ دارند. همچنین اگر خطر ماسیدن سفاله جدی باشد بهتر است از فرزهای کم‌پر استفاده کنید. ولی وقتی ضخامت سفاله پایین می‌آید و کیفیت سطح اهمیت پیدا می‌کند اولویت با فرزهای چهارپر به بالاست.

مرور کلی آناتومی فرز در اینجا به اتمام می‌رسد. البته باید یادآور شوم که بحث فوق به هیچ وجه کامل نیست زیرا فرزهای مختلف اجزای دیگری هم دارند. برای مثال فرز تیپ (tip) در کنارهٔ پیشانی دارای یک سطح پخ (chamfer) است و فرز مخصوص خشن‌کاری دارای دندانه‌هایی (cobs) روی پشته است که وظیفه‌شان ریزریز کردن سفاله‌هاست. ولی پرداختن به اطلاعات جزئی‌تر لازم نیست و به نظرم همین مقدار اطلاعات کلی برای شروع کار کافی است.

مفاهیم پایه

در ابتدا باید با برخی مفاهیم و اصطلاحات پایه‌ای آشنا شوید که ماشین‌کارها حین بحث دربارهٔ پیشروی و سرعت به کار می‌برند.

سرعت[1]**:** این اصطلاح به سرعت چرخش اسپیندل اشاره دارد و بر حسب «rpm» (دور در دقیقه[2]) بیان می‌شود. طی مجموعه آزمایش‌هایی که پیشتر در زمینهٔ ماشینکاری صورت گرفته مشخص شده سرعت اسپیندل عمده‌ترین عامل تعیین‌کنندهٔ عمر ابزار است. گردش بیش‌ازحد باعث تولید حرارت زیادی می‌شود که آن هم به نوبت خود ابزار را نرم کرده و لبه‌ها را کند می‌کند (حرارت به طرق دیگری هم بالا می‌رود). در ادامه دربارهٔ چگونگی افزایش عمر ابزار بحث خواهیم کرد؛ در حال حاضر فقط به این موضوع توجه داشته باشید که سرعت اسپیندل مهم‌ترین عامل در حداکثرسازی عمر ابزار است.

پیشروی[3]**:** این اصطلاح به سرعت حرکت ابزار برحسب یکی از واحدهای طولی (اینچ در دقیقه یا میلیمتر در دقیقه) اشاره دارد. هدف اصلی تعیین نرخ پیشروی حداکثرسازی میزان براده‌برداری است. نرخ براده‌برداری یعنی اینکه فرز شما با چه سرعتی چه حجمی از تراشه ایجاد می‌کند. اکثر ماشینکارها ترجیح می‌دهند این سرعت را تا جایی که مشکلی پیش نیاید افزایش دهند. اما اگر پیشروی خیلی سریع باشد معمولاً شکستن ابزار یا کرنجه دادن سطح مسأله‌ساز می‌شود.

---

[1] Speed
[2] Revolutions per minute
[3] Feed

یکی از کژفهمی‌های رایج این است که اگر بخواهیم محافظه‌کارانه هوای همه چیز را داشته باشیم می‌توانیم «شل‌تراشی» کنیم.گویا کافی است سرعت را پایین بیاوریم و پیشروی را کم کنیم تا آب از آب تکان نخورد. ولی این کار دقیقاً درست نیست. فلزات رحم و مروت سرشان نمی‌شود. پیشروی و سرعت نامناسب می‌تواند حین کار با چوب یا پلاستیک یا سایر مواد نرم یک‌سری مشکلات جزئی به بار بیاورد اما کار با فلزات بسیار حساس‌تر و دردسرسازتر است.

بگذارید به کمک چند مثال ببینیم در صورت کند کار کردن چه اتفاقاتی می‌تواند بیافتد:

اگر سرعت نسبت به پیشروی خیلی کم باشد پره‌های ابزار وادار می‌شوند بار خیلی زیادی بردارند. فرز با شتاب زیادی به دل برش می‌زند و تراشه‌ها خیلی بزرگ می‌شوند. بدین ترتیب ابزار به سادگی می‌شکند.

اگر پیشروی نسبت به سرعت بیش از حد پایین باشدپره‌های ابزار خیلی زود ساییده شده و به جای تراش دادن و براده‌برداری به قطعه مالیده می‌شوند و آن را صیقلی می‌کنند. بسیاری از ماشینکارها می‌دانند سریع‌ترین راه برای کند کردن ابزار این است که با دور معکوس اسپیندل یک پاس بردارند؛ پیشروی بیش‌ازحد پایین هم دقیقاً چنین تأثیری دارد. در ادامه در این مورد بیشتر بحث خواهیم کرد. فعلا این را داشته باشید که کند کار کردن به اندزهٔ تند کار کردن دردسر دارد؛ اگر نگوییم دردسرش بیشتر است.

نسبت میان پیشروی و سرعت در هر عملیات در یک نقطهٔ طلایی به حداکثر کارآیی می‌رسد. درست است که لزومی ندارد دقیقاً به همین نقطه بزنیم ولی محوطهٔ حول نقطهٔ طلایی خیلی بزرگ نیست و اگر به‌کل خطا بزنیم اشتباه‌مان تاوان‌هایی خواهد داشت. هر چه جنس کار سخت‌تر باشد نقطهٔ طلایی کوچک‌تر می‌شود و تاوان‌های خطا بدتر. وقتی نقطهٔ طلایی را بیابید می‌توانید ضرایب برش را در همان محدوده کم و زیاد کنید تا به حداکثر نرخ براده‌برداری یا پرداخت سطح یا طول عمر ابزار برسید. اغلب می‌توان دو مؤلفه از این سه را هم‌زمان به

حداکثر رساند اما حداکثرسازی هم‌زمان هر سه غیرممکن است. اجازه دهید نقطهٔ طلایی را از منظر مناطق خطر بررسی کنیم:

سوختن ابزار		
حداکثر براده‌برداری	براده‌برداری سنگین احتمال شکستن ابزار	∧
پرداخت سطح عالی	حداکثر عمر ابزار و براده‌برداری بالا پرداخت سطح متوسط	
سایش سطوح کند شدن ابزار	در ماشین‌های پیر مناسب فرز HSS	نرخ پیشروی
<	**سرعت اسپیندل**	

این جدول بیانگر مقادیر نسبی است؛ بدین معنی که نمی‌توان بر اساس آن به هیچ پیش‌فرضی دربارهٔ نسبت‌ها و مقیاس‌های عملی رسید. در این جدول صرفاً می‌توان محدوده‌های مختلف را از لحاظ سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی با یکدیگر مقایسه کرد.

اجازه دهید این مناطق را دانه‌دانه از چپ به راست و از بالا به پایین دقیق‌تر مطالعه کنیم.

براده‌برداری سنگین: همان‌طور که پیشتر بحث شد اگر پیشروی بسیار بالاتر از سرعت باشد احتمالاً ابزار خواهد شکست. هر چه نرخ پیشروی بالاتر باشد این خطر بالاتر خواهد رفت و نقطه‌ای وجود دارد که احتمال شکستن ابزار در آنجا به صددرصد می‌رسد. دقیقاً مثل حالت مهملی که ابزار را با دور اسپیندل صفر به دل کار برنید. تق! ابزار شکست!

حداکثر براده‌برداری [4]**:** نقطهٔ طلایی برای حداکثر براده‌برداری جایی است که در آن اسپیندل با بیشترین سرعت می‌چرخد (بدون آنکه ابزار بسوزد) و پیشروی در سریع‌ترین حالت ممکن

[4] MRR

است (بدون آنکه ابزار بشکند). در این نقطه است که تولید به بیشترین بارآوری می‌رسد و قابلیت رقابتی پیدا می‌کند.

سوختن ابزار: اگر سرعت اسپیندل بیش از حد بالا برود ابزار داغ می‌کند و در نتیجه خیلی زود کند می‌شود. البته در شرایطی که جنس قطعه خوش‌تراش باشد یک‌سری استثنائات پیش می‌آید که در بخش‌های پیشرفته بحث‌شان خواهد آمد.

حداکثر عمر ابزار: اگر سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی را همراه با یکدیگر اندکی از محدودهٔ طلایی براده‌برداری پایین‌تر بیاوریم به حداکثر عمر ابزار می‌رسیم. در این حالت نرخ براده‌برداری کماکان بالاست. همچنین اگر نرخ پیشروی را اندکی کمتر کنید می‌توانید به کیفیت سطح متوسط برسید. در این خصوص کمی جلوتر در مورد فورمول تیلور بحث خواهیم کرد. فعلاً کافی است این را به خاطر داشته باشید که اگرچه کاهش اندک هر دو عامل تأثیرگذار است ولی کاهش سرعت نقش به مراتب مهم‌تری از کاهش پیشروی دارد.

پرداخت سطح عالی: چنانچه کیفیت نهایی سطح برایتان مهم است باید سرعت اسپیندل را در محدودهٔ نقطهٔ طلایی براده‌برداری حفظ کنید و در همان حال نرخ پیشروی را پایین بیاورید. توجه داشته باشید کاهش پیشروی مرزی دارد که تجاوز از آن به معنای ساییده‌شدن سریع ابزار و کاهش عمر مفید آن است.

ماشین‌های پیر: اگر سرعت اسپیندل را خیلی پایین بیاورید و نرخ پیشروی را به همان نسبت کاهش دهید به این محدوده خواهید رسید. در ماشین‌های پیری که ناچارند تحت چنین شرایطی کار کنند بهتر است از فرزهای «HSS» استفاده شود. شاید خیلی‌ها از شنیدن این حرف تعجب کنند که در برخی محدوده‌های خاص «HSS» می‌تواند روی دست فرز «کارباید» بلند شود؛ اما این موضوع بسته به توانایی‌های ماشین و جنس قطعهٔ کار می‌تواند رنگ حقیقت به خود بگیرد. در مورد این هم جلوتر بحث خواهیم کرد.

سایش سطوح: اگر نرخ پیشروی را باز هم پایین بیاورید به جای برش دادن قطعهٔ کار آن را می‌سایید و بدین ترتیب دخل لبهٔ تیز پره‌های ابزارتان را می‌آورید.

اکنون که می‌دانید تجاوز از نقطهٔ طلایی به چه معناست تصور روشن‌تری از اهمیت تنظیم پیشروی و سرعت برای رسیدن به نتیجهٔ مطلوب دارید.

ضخامت سفاله و سرعت محیطی

قبل از شروع بحث محاسبهٔ هدف‌مند پیشروی و سرعت باید با چند مفهوم دیگر آشنا شوید.

میزان براده‌برداری یا ضخامت برش به ازای هر پره[1]: نرخ پیشروی مشخص‌کنندهٔ میزان حرکت طولی در هر دقیقه است اما شاخص بااهمیت «میزان براده‌برداری» به ضخامت سفاله‌ها یا تراشه‌های ریزی برمی‌گردد که کمابیش شکل ویرگولی (،) یا استرس‌مانند (,) دارند؛ در هر صورت یک سر سفاله‌ها ضخیم و سر دیگرشان نازک از کار درمی‌آید. عجالتاً از این تمایز می‌گذریم که سر سفاله‌ها ضخیم‌تر است یا ته‌شان؛ اما همانطور که بعدتر خواهید دید این تفاوت بسیار مهم است.

گرچه «میزان براده‌برداری» در واقعیت توسط سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی و تعداد پره‌های ابزار تعیین می‌شود اما در جریان محاسبات و روی کاغذ متغیر مستقلی به شمار می‌آید که بیانگر میزان سختی عملیات ماشین‌کاری است. به راحتی می‌توانید تصور کنید که چنین شاخصی چقدر به‌دردبخور خواهد بود. از همین روست که ابزارسازها و ماشین‌کارها ترجیح می‌دهند در مورد هر فرز خاص در درجهٔ اول از «میزان براده‌برداری» صحبت کنند.

در هر دور اسپیندل پره‌های فرز به نوبت با قطعهٔ کارمان درگیر می‌شوند و آن را مقداری برش می‌دهند. بنابراین هر پره فقط در کسری از یک دور اسپیندل می‌تواند برشی بزند که ایجادکنندهٔ یک سفاله با ضخامت مشخص است. چرخش اسپیندل باعث می‌شود این پره

[1] Chipload or Chip Thickness per Tooth

کنار برود و جایش را به پرهٔ بعدی بدهد. برای آنکه پرهٔ دوم بتواند سفاله‌ای با همان ضخامت ایجاد کند لازم است ابزار به اندازهٔ کافی در دل قطعهٔ کار پیشروی کند. بدیهی است که در شرایط ثابت هر چه تعداد پره‌های ابزار بیشتر باشد ضخامت سفاله‌ها کمتر خواهد شد. بنابراین اگر بخواهیم میزان براده‌برداری را ثابت نگه داریم باید نرخ پیشروی را متناسب با افزایش تعداد پره‌ها بیشتر کنیم. فرزهایی که شیارهای بیشتری دارند می‌توانند با نرخ پیشروی بالاتری کار کنند. برای مثال به فرض ثابت ماندن همهٔ شرایط نرخ پیشروی یک فرز 4 میل شش‌پر می‌تواند 3 برابر یک فرز 4 میل دوپرباشد.

به راحتی می‌توانید تصور کنید اگر یک ابزار بخواهد تکه‌های خیلی بزرگی را از قطعهٔ کار بردارد چه فشاری به آن وارد می‌آید. چنین کار سنگینی احتمالاً به لب‌پر شدن یا شکستن ابزار منجر خواهد شد. اما فقط این نیست. مسألهٔ دیگر این است که سفاله‌های بزرگ نمی‌توانند از مسیر برش کنار بروند و ابزار را خفت می‌کنند. در دوران‌های ابتدایی ماشین‌کاری نرخ شکستن فرز به دلیل کند بودن فرایند تخلیهٔ مسیر برش و نتیجتاً خفت شدن ابزار بسیار بیشتر از نرخ شکستگی در اثر پیشروی بالا بود. در حال حاضر معمولاً از فشار باد یا فشار آب برای کنار زدن سفاله‌ها استفاده می‌شود و مشکل تا حدی برطرف گشته؛ اما هنوز هم اگر ابزار در شکاف عمیقی مشغول کار باشد به سختی می‌توان سفاله‌ها را از سر راه برداشت. اگر انبوهی از سفاله‌ها در عمق سوراخ یا شکافی تنگ جمع شده باشند می‌توانند دردسرساز شوند و به‌ناچار باید کار را به‌کندی پیش برد.

نکتهٔ دیگر اینکه حجم سفاله‌ها بیشتر از حالت یک‌پارچه‌شان در دل قطعهٔ کار است و به همین دلیل فضای بزرگتری را اشغال می‌کنند. این مسأله وضع را بدتر می‌کند زیرا سفاله‌های تحت فشار جایی جز لای شیارهای فرز پیدا نمی‌کنند. این را هم در نظر داشته باشید که هر

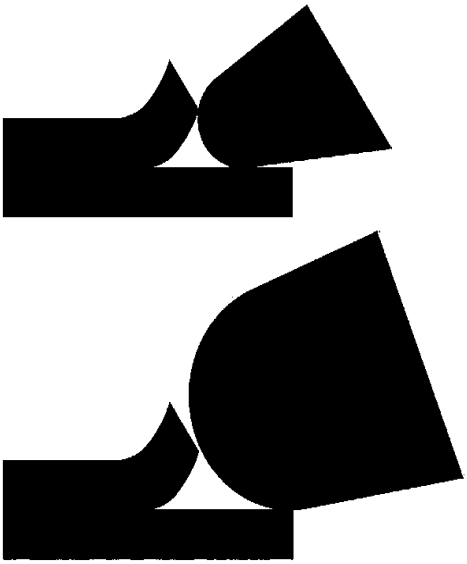
چه تعداد پره‌های فرز زیادتر شود فضای خالی بین شیارهای آن کمتر می‌شود و موجب بروز بازده نزولی ابزار می‌گردد. برخی مواد گرایش دارند چنان سفاله‌های بزرگی ایجاد کنند که چاره‌ای جز استفاده از فرزهای دوپر یا سه‌پر باقی نمی‌ماند. برای مثال آلومنیوم نمونهٔ خوبی از عدم کارایی فرزهای چهارپر است.از این رو به تازه‌کارها گفته می‌شود برای آلومنیوم از فرزهای دوپر (یا سه‌پر) استفاده کنند. اما آیا هیچ وقت نمی‌توان فرز چهارپر را روی آلومنیوم به کار گرفت؟ حال که می‌دانید دلیل توصیهٔ فوق چیست می‌توانید به شرایطی بیاندیشید که لازم نیست خود را به تعداد پره‌های کم محدود کنید. به طور کلی هر وقت فضای خالی زیادی وجود داشته باشد و سفاله‌ها بتوانند به سادگی تخلیه شوند می‌توان از فرزهای چهارپر استفاده کرد تا به پرداخت سطح بهتری رسید. اما «فضای خالی زیاد» دقیقاً چقدر است؟

حفره‌ها و شیارهای عمیق بدترین موارد برای استفاده از فرز چهارپر هستند. آن‌ها را فراموش کنید. همچنین از کنج‌های تنگ و سوراخ‌هایی که قطرشان کمی بزرگ‌تر از ابزار است صرف‌نظر کنید زیرا می‌توانند دردسرساز شوند. اما در خصوص دورتراشی‌هایی که فاقد قوس‌های مقعرند و فقط قوس محدب دارند چطور؟ در اینجا به اندازهٔ چند تن برای سفاله‌ها فضای خالی هست؛ پس با خیال راحت از آن استفاده کنید. در پاکت‌های گشاد و جادار هم می‌توان از فرز چهارپر استفاده کرد؛ مخصوصاً اگر سوراخ بزرگی در وسط پاکت برای شروع کارتان ایجاد کنید. در پاس‌های پرداخت‌کاری هم می‌توان به منظور دستیابی به کیفیت سطح از فرزهای چهارپر بهره برد. زیرا پاس‌های پرداخت‌کاری بسیار نازک‌اند و در مرحلهٔ خشن‌تراشی به‌اندازهٔ کافی برای آن‌ها جا باز شده است.

به‌طور کلی در اکثر مواد نرم بهتر است خشن‌تراشی با فرزهای دوپر یا سه‌پر و مرحلهٔ پرداخت‌کاری با فرز چهارپر انجام شود. در موادی که سختی بالایی دارند معمولاً سفاله‌ها دردسرساز نیستند و می‌توان فرزهای شش‌پر و بالاتر را به کار زد.

ماشین‌کارهای حرفه‌ای این را به خوبی می‌دانند که در دورتراشی موادی مانند فولادهای متوسط حتماً باید از فرزهای چهارپر به بالا استفاده کرد تا بارآوری کار قابل‌قبول باشد. در این قبیل موارد یک فرز شش‌پر می‌تواند سرعت کار را تا 60 درصد فرزهای چهارپر افزایش دهد. البته گاهی هم باید برعکس عمل کرد. برای مثال در استیل‌های سخت ضدزنگ که سفاله‌های کیپ‌کننده دارند بهتر است از فرزهای سه‌پر استفاده کنید.

پس از این مقدمات به بحث میزان براده‌برداری باز می‌گردیم. در فصل قبل به مسألهٔ «سایش ابزار» اشاره شد که در نرخ‌های پایین پیشروی بروز می‌کند. اکنون باید این مسأله را از لحاظ ضخامت سفاله بررسی کنیم. پیش از هر چیز اجازه دهید لبه‌های تیز فرز و کارشان را از دید میکروسکوپی بنگریم. در تصویر زیر شکل اول نشان‌دهندهٔ حالتی است که ضخامت تراشه بیشتر از لبهٔ تیز فرز است. بنابراین پرهٔ فرز می‌تواند به راحتی در حین پیشروی زیر تراشه برود و آن را از قطعهٔ کار جدا کند. در شکل دوم ضخامت تراشه کمتر از لبهٔ تیز فرز است. از این رو پرهٔ فرز در حین پیشروی به جای آنکه سفاله را برش بزند و کنار بیاندازد فقط آن را زیر فشار پرس می‌کند و با ساییده شدن به سطح فوراً مستهلک می‌گردد.

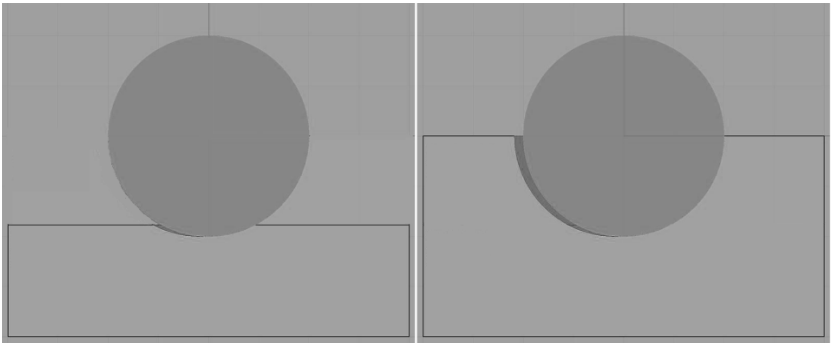


به همین دلیل ابزارسازان مدام تذکر می‌دهند پیشروی بسیار کم همان‌قدر بد است که پیشروی بسیار زیاد. زیرا هر چه نرخ پیشروی نسبت به سرعت اسپیندل پایین بیاید تراشه‌ها کوچک و کوچک‌تر خواهند شد تا جایی که مشکل سایش پیش بیاید. اما کمترین ضخامت مجاز تراشه چقدر است؟ شرکت‌های مختلف این استاندارد را در کاتالوگ‌هایشان اعلام می‌کنند؛ این استانداردها اکثراً حول‌وحوش 3 میکرون (برای فرز آکبند) نوسان می‌کند. به عنوان یک قاعدهٔ کلی باید گفت ضخامت تراشه نباید از 20 درصد لبهٔ تیز فرز کم‌تر باشد.البته اندازه‌گیری دقیق لبه‌های تیز کار دشواری است. ابزارهای مدرنی که مخصوص آلومنیوم ساخته می‌شوند تیزی بیشتری دارند و لبهٔ ابزارهای اینسرتی کم‌تر تیز است.

حتی به فرض اینکه شما ضخامت مطلوب سفاله را تعیین کنید وسرعت و پیشروی را طبق پیشنهادات سازندهٔ ابزار تنظیم نمایید باز هم این احتمال وجود دارد که بیشترین آسیب‌های

سایشی را به لبه‌های فرز وارد بیاورید و از عمر آن به شدت بکاهید. دلیل‌اش این است که در هر عملیات ماشین‌کاری واقعی عوامل زیادی دخیل‌اند که به هیچ وجه در جداول سادهٔ کاتالوگ‌ها مورد توجه قرار نگرفته‌اند. یکی از مهم‌ترین این عوامل میزان درگیری قطر ابزار یا «گوشت برش»[2] است که در اکثر جداول ارائه‌شده خبری از آن نیست.

بگذارید با ذکر یک مثال واقعی این مسأله را روشن‌تر کنیم. فرض کنید می‌خواهیم یک قطعه فولاد با سختی متوسط را توسط فرز چهاپر 10 میل «HSS» دور تراشی کنیم. در حالت اول طرح‌مان این است که عملیات فوق را با برشی معادل نصف قطر ابزار انجام دهیم. در حالت دوم می‌خواهیم این کار را با برشی ظریف که معادل 5 درصد قطر ابزار است تمام کنیم. تصویر زیر تفاوت این دو حالت را نشان می‌دهد:



[2] Radial depth of cut

این اصطلاح را در ترجمهٔ فارسی تغییر دادم تا با مفهوم «استپ‌داون» اشتباه گرفته نشود و به سوءتعبیر نیانجامد. در منابع مختلف برای بیان این دو مفهوم از کلمات «Radial Depth of cut» یا « Width of cat» (گوشت برش) و «Axial Depth of cut» یا «Depth of cut» (عمق برش) استفاده می‌شود. بدیهی است که عمق برش همواره مساوی استپ‌داون خواهد بود؛ اما اگر استپ‌اورها همپوشانی داشته باشند آنگاه گوشت برش کوچک‌تر از استپ‌اور می‌شود. (م.)

ناحیهٔ خاکستری تیره در هر دو تصویر نشان‌دهندهٔ گوشت برش است. همان‌طور که ملاحظه می‌کنید برش در حالت نخست گوشت زیادتری دارد و لازم است با سرعت بالاتر و پیشروی پایین‌تر کار کنیم. اما گوشت برش در حالت دوم کم‌تر است و باید سرعت را پایین بیاوریم و به پیشروی بیافزاییم. کاتالوگ سازندگان ابزار (و همچنین فورمول‌های استاندارد محاسبهٔ پیشروی و سرعت) این تفاوت را لحاظ نمی‌کنند و با ارائهٔ ارقام یکسان برای هر دو حالت ما را به نتایج گمراه‌کننده‌ای می‌رسانند. وانگهی باید توجه داشته باشید که با کاهش چشمگیر میزان درگیری قطر ابزار لاجرم به نقطه‌ای می‌رسید که افزایش پیشروی دردی را دوا نمی‌کند؛ زیرا گوشت برش آن‌قدر کم شده است که سفاله به هیچ وجه تشکیل نمی‌شود. در این حالت بروز پدیدهٔ سایش اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

به طور استاندارد اعداد پیشنهادی اولیهٔ ابزارسازها بیانگر سرعت و پیشروی مطلوب در حالت درگیری نصف قطر ابزار است و اگر این شرط را رعایت کنید نیاز به محاسبات بیشتر نیست. اما بعضی ابزارسازها هم هستند که برای حل مشکل فوق جداولی را منتشر کرده‌اند که نشان می‌دهد به ازای چند درصد از درگیری قطر ابزار باید پیشروی چقدر افزایش یابد.

سرعت محیطی [3]: همانطور که دید ضخامت سفاله مناسب‌ترین شاخص برای تنظیم نرخ پیشروی است. به همین ترتیب «سرعت محیطی» هم مناسب‌ترین شاخص برای تنظیم سرعت اسپیندل است. در واقع ضخامت سفاله و سرعت محیطی دو متغیر مستقل هستند که به ترتیب مقدارپیشروی و سرعت را تنظیم می‌کنند.

سرعت محیطی توسط واحدهای طولی اندازه‌گیری می‌شود؛ گاه بر حسب فوت در دقیقه گاه بر حسب متر در دقیقه. اما این شاخص چه تفاوتی با نرخ پیشروی دارد؟ قرقره‌ای را در نظر

[3] Surface speed

بگیرید که حین حرکت می‌چرخد و مقداری نخ آزاد می‌کند. نرخ پیشروی بیانگر مقدار حرکت مرکز این قرقره در هر دقیقه است؛ اما سرعت محیطی طول نخی را که در هر دقیقه آزاد شده است نشان می‌دهد. واضح است که هر چه قطر قرقره بیشتر باشد و هر چه با سرعت بیشتری بچرخد نخ بیشتری آزاد می‌شود.

سرعت محیطی شاخص بسیار حساسی است و به هیچ وجه نمی‌توان آن را دست‌کاری کرد. تجاوز از سرعت محیطی پیشنهادی سازندگان لاجرم به کاهشی شدید در طول عمر ابزار خواهد انجامید. فقط موارد «ماشین‌کاری فوق‌سریع»[4] از این قاعده مستثنایند که بعد از تسلط به مفاهیم ابتدایی و پس از خبره شدن در تمامی جنبه‌های پیشروی و سرعت می‌توان به سراغ آن رفت.

[4] HSM: High Speed Machining

محاسبهٔ پیشروی و سرعت

کسب بهترین نتیجه از ماشین سی‌ان‌سی پیش‌زمینه‌های زیادی دارد. قبل از هر چیز باید گفت تنظیمات بهینه‌سازی ماشین بسته به اهداف مختلف تفاوت دارند. این اهداف سه‌گانه بدین شرح‌اند: حداکثرسازی نرخ براده‌برداری، حداکثرسازی عمر ابزار، حداکثرسازی کیفیت پرداخت سطح.

اینکه کدام یک از این سه هدف اولویت دارند وابسته به تصمیم شماست. از آنجا که هر هدف مستلزم به‌کارگیری تکنیک‌های خاص خودش است نمی‌توان در آن واحد به هر سه هدف دست یافت و کیفیت سطح عالی و حداکثربراده‌برداری و حداکثر عمر ابزار را یکجا به دست آورد. در این فصل تنظیماتی را مرور می‌کنیم که می‌توانید به کمک آنها عملکرد ماشین را متناسب با اهداف خاص‌تان بهینه‌سازی کنید.

راه‌های متفاوتی برای دستیابی به تنظیمات بهینه وجود دارد. ماشین‌کارهای مختلف یکی از این روش‌ها را در پیش می‌گیرند: فرایند آزمایش و خطا، رجوع به تجارب استادکاران باسابقه، اکتفا به معیارهای کلی، انجام محاسبات با استفاده از جداول استاندارد و ماشین‌حساب، اتکا به ارقام پیشنهادی مندرج در کاتالوگ ابزار، استفاده از نرم‌افزارهای محاسباتی ماشین‌کاری، اتکا به محاسبات برنامه‌های «CAM» و «CAD».

برخی ماشین‌کارها ترجیح می‌دهند از روی صدای ماشین و با اتکا به تجارب خودشان و توصیه‌های دیگران و معیارهای کلی به پیشروی و سرعت مطلوب برسند. در دوران ماشین‌کاری دستی این رویکرد می‌توانست درست از کار دربیاید. ماشین‌کار می‌توانست با

لمس و سنجش وضع هندویل به اندازهٔ کافی از وضعیت عملیات بازخورد به دست بیاورد. همچنین باید توجه داشت سرعت اسپیندل در فرزهای منوال به ندرت از 6 هزار دور بالاتر می‌رفت و در این شرایط می‌شد به سادگی نرخ پیشروی مطلوب را به دست آورد؛ مخصوصاً اینکه در صورت استفاده از فرزهای «HSS» سوءتأثیر اشتباهات احتمالی کمتر به چشم می‌آمد. وانگهی در آن دوران این امکان وجود داشت که یک استادکار سردوگرم‌چشیده دائماً مراقب‌تان باشد و نگذارد دسته‌گل به آب دهید.

متأسفانه یا خوشبختانه آن دوره سرآمده است.اکنون ماشین‌های «CNC» با سرعت بسیار بیشتری کار می‌کنند و می‌توانند قطعاتی بزنند که بهترین استادکاران فرز منوال حتی خواب‌اش را هم نمی‌دیدند. در عین حال هندویل سی‌ان‌سی دیگر هیچ بازخوردی به شما نمی‌دهد. علاوه‌براین فضای تولید بسیار رقابتی‌تر شده و جایی برای خطا و اشتباه نمانده است. در این فضا شما باید بتوانید ماشین را به حداکثر عملکرد مطلوب‌اش برسانید و وقت را تلف نکنید.

از سوی دیگر ماشین «CNC» مطلقاً فاقد شعور و احساس است و بدون توجه به اتفاقاتی که حین عملیات پیش می‌آیند کار خودش را می‌کند. با توجه به اینکه اتفاقات ناخوشایند با سرعت زیاد و خیلی ناگهانی پیش می‌آیند اپراتور سی‌ان‌سی فقط می‌تواند کلید امرجنسی را بزند؛او دیگر قادر نیست مثل یک فرزکار منوال فعالانه در عملیات مداخله کند.

البته تجربهٔ کاری هنوز هم ارزش دارد. اما بهتر است از تجربه برای دستیابی به پیشرفت استفاده کنیم و به تاکتیک‌های جدید ماشین‌کاری برسیم نه آن که وقت‌مان را با اختراع دوبارهٔ چرخ هدر بدهیم. تجربه مادر دانش است؛ اما در حال حاضر دانش ما در زمینهٔ پیشروی و سرعت تکمیل شده و چیزی برای کشف کردن نمانده است. در این دوران می‌توانیم با استفاده

از چند محاسبهٔ سرانگشتی به سرعت به نتایج مطلوب برسیم. پس چرا فرایند سخت و طاقت‌فرسای تجربه‌اندوزی را به جای کارهای مهم‌تر صرف چنین چیز پیش‌پاافتاده‌ای کنیم؟

درست است که علم پیشروی و سرعت علم کاملی است و همهٔ اطلاعات آن در دسترس قرار دارد اما نباید به فورمول‌سازی‌های ساده‌انگارانه در این مورد اکتفا کرد. برای رسیدن به نتیجهٔ درست باید همهٔ عوامل مؤثر را در تحلیل‌هایتان بگنجانید. حتماً همهٔ شما در منابع مختلف چندین بار با فورمول زیر برای محاسبهٔ پیشروی و سرعت (موسوم به فورمول تیلور) روبرو شده‌اید:

$$RPM = \frac{Vc \times 1000}{\pi \times D}$$

$$F = RPM \times n \times Ft$$

در این فورمول داریم:

RPM: سرعت اسپیندل

V_c: استاندارد سرعت محیطی (یا سرعت برش)

D: قطر ابزار

F: نرخ پیشروی

N: تعداد پرهٔ ابزار

F_t: ضخامت سفاله (یا میزان براده‌برداری هر پره)

به‌علاوه مقادیر استاندارد سرعت محیطی برای مواد مختلف در جداولی شبیه جدول صفحهٔ بعد مرتب شده‌اند. به طوری که روی کاغذ همه چیز درست و مرتب به نظر می‌رسد. ولی

وقتی به مرحلهٔ عمل می‌رسید به احتمال زیاد از کردهٔ خود پشیمان می‌شوید. مشکل کجاست؟

Material type	Meters per min (MPM)
Steel (tough)	18–50
Mild Steel	3–38
Mild Steel (with coolant)	6–7
Cast Iron (medium)	1–2
Alloy Steels (1320–9262)	3–20
Carbon Steels (C1008–C1095)	4–51
Free Cutting Steels (B1111–B1113 & C1108–C1213)	35–69
Stainless Steels (300 & 400 series)	23–40
Bronzes	24–45
Leaded Steel (Leadloy 12L14)	91
Aluminium	122-305
Brass	90–210
Machinable Wax	6
Acetal Copolymer (Delrin)	11
Polyethylene	12
Acrylic (with coolant)	15
Wood	183–305

پیشتر به یکی از دلایل خطا رفتن تیر فورمول تیلور اشاره کردیم. در اینجا به هیچ وجه مسألهٔ کوچک‌شدن تراشه مد نظر قرار نگرفته است. به همین دلیل اگر در عمل کمتر از نصف قطر ابزار شما درگیر کار شود مشکل نازکی بیش از حد تراشه و نتیجتاً خطای محاسباتی پیش می‌آید. هر چه میزان درگیری قطر ابزارتان کمتر شود خطای محاسباتی بزرگ‌تر می‌گردد تا جایی که ارقام به‌دست‌آمده دیگر عملاً به هیچ دردی نمی‌خورند. متاسفانه برنامه‌های «CAM» و «CAD» نیز از این نقیصه رنج می‌برند و فورمول‌های ساده‌انگارانه‌شان نمی‌تواند به نتایج دقیقی بیانجامد.

برای برطرف کردن این نقیصه باید به دنبال فورمول درگیری قطر ابزار هم باشید. همچنین باید جدول مفصل‌تری برای سرعت محیطی استاندارد تهیه کنید و جداول پرطول‌وتفصیل میزان براده‌برداری استاندارد را هم بیابید. همچنین باید به اطلاعات لازم برای عمق برش مطلوب دسترسی داشته باشید. بهترین حالت این است که جداول مزبور فقط دربردارندهٔ دسته‌بندی‌های کلی نباشند بلکه اطلاعات هر آلیاژ خاص را به طور جداگانه ارائه کنند. بدین‌ترتیب حجم اطلاعات به طرز آزاردهنده‌ای زیاد می‌شود. حتی این احتمال پیش می‌آید که حین زیرورو کردن جدول‌های مختلف و وارد کردن اعداد در ماشین حساب خطای کوچکی کنید و به نتایج یکسر غلط برسید. پیداست که استفاده از یک برنامه یا اپلیکیشن تخصصی برای محاسبهٔ پیشروی و سرعت معقول‌ترین راه حل است. مزیت برنامه‌ها و نرم‌افزارهایی نظیر «G-wizard» و «HSMadvisor» یا اپلیکیشن‌هایی مانند «FSwizard» دو دلیل دارد:

1- این برنامه‌ها در مقایسه با روش‌های سادهٔ محاسباتی به نتایج بهتری می‌رسند زیرا می‌توانند در آن واحد چندین متغیر مستقل را با یکدیگر ترکیب کنند تا به

شاخص‌های جامع و مانع برسند؛ چیزی که عملاً با کمک ماشین‌حساب معمولی قابل حصول نیست. برای مثال در نظر بگیرید که ترکیب چهار متغیر (الف) قطر ابزار (ب) تعداد پره‌های ابزار(ج) زاویهٔ مارپیچ (د) میزان درگیری قطر ابزار در قالب یک شاخص واحد چه کار پیچیده‌ای است.

2- فرایند و سرعت ماشین‌کاری به گونه‌ای است که شما عملاً زمان کافی برای گردآوری همهٔ اطلاعات موردنیاز را ندارید. بدیهی است که برنامه‌های فوق با چنین محدودیتی روبرو نیستند.

استفاده از برنامه‌های محاسباتی ساده و سرراست است. اینکه برخی ماشین‌کارها نمی‌خواهند از این امکان بهره‌مند شوند مطلقاً ناموجه است. شاید آنان تحت فشار فضای رقابتی قرار ندارند؛ شاید هم به قدری محافظه‌کار و واپس‌گرا هستند که به‌روزرسانی پیشروی و سرعت برایشان مهم نیست و ترجیح می‌دهند با همان استانداردهای قدیمی‌ای کار کنند که بدان خو گرفته‌اند. بگذریم. کیست که نخواهد به حداکثربراده‌برداری یا حداکثر کیفیت سطح یا حداکثر عمر ابزار برسد؟

شاید ماشین‌کارهای مدرن‌تر این سوال را مطرح کنند که «مگر استانداردهای پیشنهادی سازندگان ابزار که در کاتالوگ‌هایشان آمده است ما را به پیشروی و سرعت بهینه نمی‌رساند؟» در پاسخ باید گفت: «بله. کاتالوگ ابزار می‌تواند کمک کند. اما موضوع کمی پیچیده‌تر از این‌هاست.» بسیاری از ماشین‌کارها هستند که پس از اجرای دستورالعمل‌های کاتالوگ‌ها از این کار دلزده شده‌اند و ایمان آورده‌اند که کاتالوگ‌ها کارکردی صرفاً تجاری و تبلیغاتی دارند. به باور ایشان ارقام مندرج در کاتالوگ‌ها بسیار بیشتر از توان واقعی فرزهایی است که خریده‌اند. شاید در بعضی موارد معدود این حرف درست باشد اما در اکثر موارد نوعی بدبینی

نابه‌جاست. کدام تولیدکنندهٔ بزرگ حاضر است در کاتالوگ‌اش مشتی دروغ بنویسد و اعتبار و بازار خودش را به باد فنا بدهد؟ مساله بسیار ساده‌تر است: کاتالوگ‌ها صرفاً ارقام استاندارد را برای شرایط استاندارد بیان کرده‌اند؛ بدیهی است که این ارقام در شرایطی کاملاً متفاوت کارایی‌شان را از دست می‌دهند. این بدان معنا نیست که داده‌های کاتالوگ از بیخ و بن غلط‌اند. تولیدکنندگان ناچارند کاتالوگ‌شان را به ساده‌ترین صورت در اختیار مشتری بگذارند تا فهم آن راحت باشد. اگر آنان بخواهند انبوهی از داده‌ها را در کاتالوگ‌هایشان بگنجانند باید برای هر یک از ابزارهایشان یک کتابچهٔ جداگانه چاپ کنند. اما آنان دست به چنین کاری نمی‌زنند. در عوض ابزارسازان تلاش دارند برای معرفی کارشان تعداد متغیرها را به شدت محدود کنند تا بتوانند شمای کلی محصول‌شان را در یک جدول شسته‌ورفته عرضه کنند. اکثر این کاتالوگ‌ها فقط حاوی یک ماتریس دو در دو هستند: قطر فرز و جنس مادهٔ کار در برابر سرعت محیطی و ضخامت سفاله. همین و بس!

مهم‌ترین نکتهٔ برنامه‌های محاسباتی این است که امکان کنترل چه تعداد متغیر را فراهم می‌کنند و بدین ترتیب چقدر می‌توانند به شرایط واقعی کار شما نزدیک شوند؟ کنترل متغیرهای هر چه بیشتر مساوی است با حصول نتیجهٔ بهتر. برای مثال می‌توان با نرم‌افزار «G-wizard» 49 متغیر مختلف (کمی و کیفی) عملیات ماشین‌کاری را تک‌به‌تک تعریف کرد و برای این کار به 14 پایگاه‌دادهٔ جامع و قدرتمند متکی بود. کافی است این گستره را با فورمول تیلور مقایسه کنید تا به درک بهتری از توانایی‌های نرم‌افزارها برسید. آن‌ها می‌توانند بخش عظیمی از پیچیدگی‌های عملیات واقعی را شبیه‌سازی کنند و به ارقام دقیق‌تری برای بهینه‌سازی عملکرد ماشین برسند.

پس از به دست آوردن ارقام سرعت و پیشروی بهینه از روی نرم‌افزار وظایف شما به عنوان ماشین‌کار شروع می‌شود. همان‌طور که در فصل اول دیدیم محدوده‌هایی حول نقطهٔ طلایی وجود دارند که در آن‌ها یکی یا دو تا از اهداف ماشین‌کاری (حداکثرسازی براده‌برداری، حداکثرسازی کیفیت سطح، حداکثرسازی عمر ابزار) حاصل می‌شود. لازم به یادآوری است که اگر از ماشین‌های پیر استفاده می‌کنید و نمی‌توانید سرعت اسپیندل را به 10 هزار دور دقیقه و بالاتر برسانید باید مقادیر محاسبه‌شدهٔ نقطه طلایی را با استفاده از فورمول‌های نسبت‌تناسب به حدوحدود ظرفیت سی‌ان‌سی‌تان نزدیک کنید و برنامهٔ فرزکاری را بر این اساس بنویسید.

پس از دادن برنامه به ماشین و زدن دکمهٔ استارت می‌توانید از طریق کنترل‌پنل سی‌ان‌سی پیشروی و سرعت را در حدوحدودی تغییر دهید که هدف مورد نظر حاصل شود. معمولاً دامنهٔ نوسان مجاز شما در این مرحله در حدود 5 الی 25 درصد است (5 تا 10 درصد برای فلزات سخت و حداکثر 25 درصد برای مواد خوش‌تراش). باید این را هم بدانید که با 25 درصد تغییر به لبهٔ خطر می‌رسید.

برای رسیدن به حداکثربراده‌برداری باید نرخ پیشروی را بدون دستکاری سرعت طلایی اندک‌اندک بالا ببرید. برای رسیدن به حداکثر کیفیت سطح باید ضمن حفظ سرعت طلایی پیشروی را اندک‌اندک کاهش دهید. برای رسیدن به حداکثر عمر ابزار باید هم پیشروی طلایی و هم سرعت طلایی را اندک‌اندک کاهش دهید.

پیداست که در این مرحله مهم‌ترین عامل موفقیت شما داشتن پایه‌ای قوی و شناختی کامل از فرزکاری است. در واقع رسیدن به بهترین روش ماشین‌کاری در گرو دو چیز است: (الف) در مرحلهٔ برنامه‌نویسی: شناختن و کنترل کردن تعداد هر چه بیشتری از متغیرهای کلیدی که بر

فرایند ماشین‌کاری تأثیر فراوانی می‌گذارند. (ب) در مرحۀ ماشین‌کاری: یادگیری از طریق آزمون و خطا در محدوده‌های مجاز و کشف بهترین عملکرد دستگاه با توجه به شرایط و الزامات خاص محیط کارتان.

وقتی این کارها دوباره و دوباره تکرار شوند و شما داده‌های حاصله را با دقت و جزئیات کافی ثبت و ضبط کنید پس از مدتی گنج گرانبهایی در اختیار خواهید داشت که می‌تواند از هر لحاظ به پیشرفت کارتان کمک کند. این داده‌های ارزشمند به سادگی به شما خواهند گفت لبۀ خطر دقیقاً کجاست و تا کجا می‌توانید پیش بروید و برای دستیابی به نتیجۀ مطلوب تغییر کدام متغیر نقش اساسی‌تری دارد.

پس بدون توجه به موفقیت‌آمیز بودن یا شکست خوردن یک عملیات همۀ جزئیات آن را به دقت ثبت کنید. هر چه زودتر دست به کار ثبت این اطلاعات شوید زودتر می‌توانید خودتان را از سطح ابتدایی و متوسط به سطح پیشرفته برسانید.

اهمیت خنک‌کاری و برداشتن سفاله‌ها

اجازه دهید کمی از بحث پیشروی و سرعت فاصله بگیریم و دربارهٔ سیستم خنک‌کاری صحبت کنیم. متاسفانه نامیدن این سیستم به نام «خنک‌کاری» انتخاب چندان درستی نیست زیرا باعث می‌شود ماشین‌کارها اهمیت آن را نادیده بگیرند. اهمیت این مبحث را می‌توان در سه موضوع زیر خلاصه کرد:

1- **کنار زدن سفاله‌ها**: وقتی مایع خنک‌کننده با فشار روی فرز پاشیده می‌شود سفاله‌ها را از سر راه برمی‌دارد و کار را سبک می‌کند؛ در غیر این صورت ابزار مجبور خواهد شد سفاله‌ها را تا سر حد آسیاب شدن بارها و بارها بتراشد. بدین ترتیب هم کیفیت سطح از دست خواهد رفت و هم ابزار به سرعت به پایان عمرش می‌رسد. در بدترین حالت ممکن است ابزار در عمق یک شکاف یا یک حفرهٔ تنگ توسط سفاله‌ها خفت شود و بشکند.
2- **روان‌کاری**: یک سری از مواد مانند آلومنیوم و استیل گرایش به ماسیدن دارند. نیروی جاذبهٔ مولکولی میان این مواد و ابزار باعث می‌شود سفاله‌ها لابه‌لای پره‌های فرز جا خوش کنند و سفت و سخت به آن بچسبند. بنابراین مایع خنک‌کننده باید تا حدی خصلت روغنی داشته باشد تا بتواند سطح فرز را لیز کرده و جلوی این پدیده را بگیرد.
3- **خنک‌کنندگی**: مایعات (به‌ویژه محلول‌های آب‌پایه) ظرفیت حرارتی بالایی دارند و می‌توانند گرمای عملیات ماشین‌کاری را به طرز چشمگیری بگیرند.

می‌توان گفت که خنک‌کنندگی کم‌اهمیت‌ترین نقش سیستم «خنک‌کاری» است. بگذارید هر یک از این سه وظیفه را با دقت بیشتری بررسی کنیم.

مهم‌ترین کارکرد سیستم خنک‌کاری برداشتن سفاله‌ها از سر راه است. اینکه در جریان یک عملیات فرزکاری سفاله‌ها داخل یک شکاف روی هم تلنبار شوند مسالهٔ نگران‌کننده‌ای است زیرا به‌طور قطع کار را خراب خواهند کرد و طول عمر ابزار را به شدت پایین خواهند آورد و حتی احتمال دارد فرز را بشکنند. این مشکل به‌خصوص در کنج‌های داخلی پیش می‌آید؛ یعنی در جاهایی که فرز نمی‌تواند سفاله‌ها را روبه‌جلو هل دهد و به‌ناچار درگیری‌اش با آن‌ها بیشتر می‌شود. در اینگونه مواقع که فشار آب نمی‌تواند سفاله‌ها را تخلیه کند حتماً باید از فشار باد استفاده کنید.

کارکرد بعدی مایع خنک‌کننده روان‌کاری است که در درجهٔ اول باعث می‌شود تنش‌های اصطکاکی کاهش یابند و جلوی تولید حرارت بیش از حد را می‌گیرد. اما مهم‌تر از آن باعث می‌شود جذب‌شوندگی سفاله‌ها در چنگک و گلوی فرز کاهش یابد. بسیاری از ماشین‌کارها تصدیق می‌کنند که در جریان کار با آلومنیوم گه‌گاه کپهٔ بزرگی از این ماده به لابه‌لای پره‌های فرزشان می‌چسبد و روال عادی کار را مختل می‌کند. خوشبختانه مشکل فوق عمومیت ندارد و فقط در جریان کار با آلومنیوم و استیل پیش می‌آید (دلیل‌اش نبود کربن و سایر آلیاژهای همبسته در این مواد است). تیتانیوم هم تا حد زیادی گرایش به ماسیدن دارد. به هنگام کار با این مواد باید از ابزارهای فوق‌العاده تیز با زاویهٔ چنگک باز (در حالت مثبت) استفاده کنید. این کار می‌تواند تا حد زیادی خطر ماسیدگی را کاهش دهد ولی به هیچ وجه کافی نیست. فرزهای روکش‌دار هم اکثراً خاصیت ضدچسبندگی دارند و می‌توانند جلوی ماسیدن سفاله‌ها

را بگیرند؛ ولی جنس روکش‌ها به گونه‌ای است که خیلی زود ساییده می‌شود و کنار می‌رود. تنها راه‌حل قطعی این مشکل استفاده از سیستم خنک‌کننده است.

سومین کارکرد سیستم خنک‌کاری خنک کردن فرز است. البته وجود اندکی حرارت نکتهٔ مثبتی است زیرا قطعهٔ کار را نسبتاً نرم و آمادهٔ برش می‌کند. اما حرارت بیش‌ازحد به فرز آسیب می‌زند و موجب کندی لبه‌های آن می‌شود. در ادامه تنش‌های اصطکاکی افزایش می‌یابد و اتفاقات بدتری پیش می‌آید.

درجهٔ تحمل گرما در فرزهای مختلف متفاوت است. «HSS» در درجات پایین‌تر کارایی بهتری دارد؛ کارباید می‌تواند حرارت بیشتری را تحمل کند. فرزهایی که روکش‌شان از جنس «TiAlN» (نیترید تیتانیوم آلومنیوم) است برای آنکه به بهترین عملکردشان برسند واقعاً به وجود حرارت نیاز دارند. این فرزها اکثراً بدون خنک‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند زیرا فقط در صورت افزایش حرارت دچار پیرسختی[1] می‌شوند و یک لایهٔ تجدیدشدهٔ سخت در سطح‌شان تشکیل می‌گردد (به قول ماشین‌کارها فرز از خواب زمستانی برمی‌خیزد).

روایت‌های زیادی در این مورد وجود دارد که خاموش کردن سیستم خنک‌کاری موجب افزایش طول عمر فرز می‌شود. این روایت‌ها از بسیاری جهات حقیقت دارند. برای مثال اگر فرز کارباید در جریان ماشین‌کاری به نحو نامتوازن سردوگرم شود و «شوک حرارتی» ببیند ترک‌های میکروسکوپی برمی‌دارد. برای در امان ماندن از این مشکل باید یا خنک‌کننده‌تان را کلاً خاموش کنید یا آن را با چنان فشار و حجم زیادی به کار بیاندازید که خطر شوک حرارتی مرتفع شود. از آنجا که افزایش بیش‌ازحد دما با دغدغه‌های مربوط به دقت و تلرانس تباین دارد راه‌حل دوم عاقلانه‌تر به نظر می‌رسد.

[1] Precipitation hardening

پس از توضیح مفصل سه کارکرد این سیستم بگذارید انواع خنک‌کننده‌ها را از نظر بگذرانیم: خنک‌کننده‌های حل‌شونده در آب و خنک‌کننده‌های روغنی. روی کاغذ محصولات حل‌شونده در آب از نقطه‌نظر کاهش حرارت مطلقاً دست بالا را دارند. اما در واقعیت چطور؟ نگاهی به جدول زیر در مورد کاهش حرارت اصطکاکی در شرایط آزمایشگاهی بیاندازید:

جنس خنک‌کننده	دمای ویژه	% کاهش دما در فولاد آبداده	% کاهش دما در فولاد تابدیده
هوا	0.25	0.5	0.5
روغن ویسکوزیتهٔ بالا	0.49	3.9	4.7
روغن ویسکوزیتهٔ پایین	0.56	6	6
آب‌صابون	0.87	14.8	8.4
محلول سودا	0.92	11	13
آب خالص	1.00	15	19

نخستین چیزی که در جدول فوق به چشم می‌آید این است که میزان اثربخشی خنک‌کننده‌های مختلف با دمای ویژهٔ آن‌ها نسبت مستقیم دارد. نکتهٔ دوم این است میزان‌اثربخشی فقط از دمای ویژه تأثیر نمی‌گیرد. برای مثال دمای ویژهٔ هوا یک‌چهارم آب است اما تاثیر خنک‌کنندگی آب 25 برابر بیشتر است. علت این اختلاف چشمگیر چیست؟ دلیل‌اش این است که جریان هوا نمی‌تواند به نحو موثری با همهٔ سطوح اصطکاک در تماس باشد و حرارت‌شان را بگیرد. البته اگر در ماشین‌کاری به نرخ پیشروی و سرعت طلایی برسید قسمت اعظم حرارت نه توسط خنک‌کننده بلکه همراه با سفاله‌ها کنار می‌رود.

می‌بینید که اثربخشی خنک‌کننده‌های روغنی کمتر از محصولات حل‌شونده در آب است. پس تعجبی ندارد که چرا اکثر ماشین‌کارها از آب‌صابون برای خنک‌کاری استفاده می‌کنند؛ آن هم علی‌رغم اینکه آب‌صابون برای سلامتی زیان‌بار است. اما روان‌کاری روغن‌ها بهتر از آب‌صابون است و به همین دلیل ماشین‌کارها ترجیح می‌دهند در برخی موارد خاص (برای مثال در فرزکاری استیل یا تراشکاری) از آن استفاده کنند.

یک نکتهٔ دیگر دربارهٔ خنک‌کننده‌های مایع این است که وقتی سرعت ماشین‌کاری از حدوحدود خاصی بالاتر برود میزان اثربخشی همهٔ آن‌ها به شدت پایین می‌آید. دلیل‌اش این است که در ماشین‌کاری فوق‌سریع مایع فرصت کافی ندارد تا راه خودش را به همهٔ کنج‌ها و شکاف‌ها باز کند. در نتیجه خنک‌سازی به صورت کاملاً منقطع انجام می‌شود. این شرایط مستعد بروز شوک حرارتی است و شدیداً به فرز صدمه می‌زند. به همین دلیل مایعات خنک‌کننده در ماشین‌کاری فوق‌سریع هیچ جایی ندارند و در این حالت همه چیز با اتکا به فشار باد انجام می‌گیرد.

پس از این مقدمات باید بحث خنک‌کاری را با توجه به جنس قطعهٔ کار به پایان برسانیم. در این زمینه باید به 2 نکتهٔ مهم توجه داشت. نخست: مسالهٔ تمایل یک جنس خاص به ماسیدن و بنابراین درجهٔ اهمیت روان‌کاری. برای کار با جنس‌هایی که می‌توانند لای چنگک فرز بچسبند و شیاره‌های آن را بپوشانند ترجیحاً باید از خنک‌کننده‌های روغنی استفاده کنید. دوم مسالهٔ ظرفیت جذب و انتقال حرارت توسط هر جنس خاص. برخی مواد (مثلاً تیتانیوم) نمی‌توانند حرارت را به خوبی جذب و منتقل کنند. در این قبیل موارد سفاله‌ها نمی‌توانند حرارت اضافی را همراه با خود به بیرون منتقل کنند و به همین دلیل جنبهٔ خنک‌کنندگی

سیستم خنک‌کاری اهمیت می‌یابد. در صورتی که قطعهٔ کار شما از جنسی است که رسانایی حرارتی پایینی دارد ترجیحاً باید از خنک‌کننده‌های مایع استفاده کنید.

چه تکنیک‌هایی در ماشین‌کاری می‌تواند از تولید حرارت بیش‌ازحد جلوگیری کند؟ اولاً کاهش سرعت اسپیندل، دوماً افزایش پیشروی، سوماً کاهش میزان درگیری قطر ابزار.

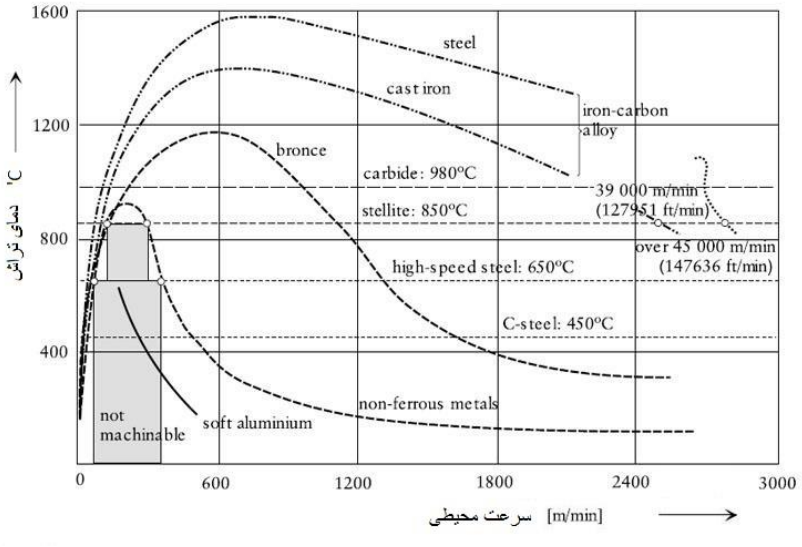
در اکثر موارد اعداد درج‌شده در کاتالوگ‌های ابزارسازها مبتنی بر فرض 30 دقیقه عمر مفید ابزار است. اما اگر سرعت‌تان را 10 درصد کاهش دهید عمر ابزار 20 درصد افزایش می‌یابد. در صورت کاهش 20 درصدی سرعت عمر ابزار 60 درصد افزایش می‌یابد. دلیل این رابطهٔ خاص میان عمر و سرعت اسپیندل چیزی جز کاهش دما نیست. افزایش عمر ابزار وقتی اهمیت می‌یابد که یک برش سنگین و زمان‌بر در پیش رو دارید و به هیچ وجه نمی‌توانید اجازه دهید فرزتان وسط کار تعویض شود.

پیشتر دیدیم که اگر نرخ پیشروی خیلی پایین باشد پدیدهٔ سایش رخ می‌دهد. در این حالت معمولاً حرارت بسیار زیادی آزاد می‌شود که در کنار سایر عوامل عمر فرز را پایین می‌آورد. مسالهٔ دیگر این است که اگر پیشروی افزایش یابد سفاله‌ها بزرگ‌تر می‌شوند؛ بنابراین هر سفاله می‌تواند مقدار گرمای بیشتری را همراه با خود از منطقهٔ برش بیرون ببرد.

سومین (و مهم‌ترین) تکنیک برای کاهش گرمای ماشین‌کاری کاستن از گوشت برش است. هر چه درصد بیشتری از قطر فرز درگیر کار باشد دمای آن بیشتر افزایش می‌یابد. برای مثال در جریان شیارزنی که پشت فرز خالی است فقط نیمهٔ جلویی با قطعهٔ کار تماس دارد؛ پس نیمی از هر دوران در هوای خالی انجام می‌گیرد. اما در عملیات سوراخ‌کاری کل قطر ابزار

درگیر می‌شود و نتیجتاً حرارت بالاتر می‌رود. بدیهی است که اگر فقط 10 درصد قطر درگیر باشد آنگاه 90 درصد هر دوران در هوای خالی است و حرارت را دفع می‌کند.

ترکیب مناسب این سه تکنیک در ماشین‌های پیر می‌تواند گره‌گشا باشد. اما در ماشین‌های مدرن همه‌چیز طور دیگری است. در «ماشین‌کار فوق‌سریع» (HSM) سرعت اسپیندل خیلی بالا می‌رود اما برخلاف انتظارمان دما افزایش نمی‌یابد. برای درک بهتر این موضوع به نمودار زیر دقت کنید:



خطوط منحنی بیانگر دمای سفالهٔ مواد مختلف در سرعت‌های محیطی مشخص هستند. خطوط نقطه‌چین افقی بیان‌گر حداکثر دمای قابل تحمل برای فرزهای مختلف هستند.

ملاحظه می‌کنید دمای سفاله‌ها همراه با افزایش سرعت محیطی به شدت افزایش می‌یابد. اما اگر سرعت محیطی از حد خاصی فراتر برود دمای سفاله آرام‌آرام پایین‌تر می‌آید تا باز هم در سرعت‌های بالاتر به حد تاب‌آوری فرز برسد. برای مثال اگر بخواهیم یک آلیاژ فولادی را توسط ماشین‌های قدیمی با فرز کارباید ماشین‌کاری کنیم باید سرعت محیطی‌مان را حدوداً 150 متر در دقیقه بگیریم تا از محدودهٔ حرارتی مجاز عدول نکنیم. اما اگر سی‌ان‌سی‌مان مدرن باشد می‌توانیم سرعت محیطی را به 3 هزار متر در دقیقه برسانیم و از دمای مجاز پایین‌تر باقی بمانیم. بدیهی است که در این حالت نرخ پیشروی‌مان بسیار بالاتر خواهد بود. این رابطهٔ فیزیکی-مکانیکی پایه و اساس انقلاب «ماشین‌کاری فوق‌سریع» یا «HSM» به شمار می‌آید.

کنترل کردن خمیدگی ابزار

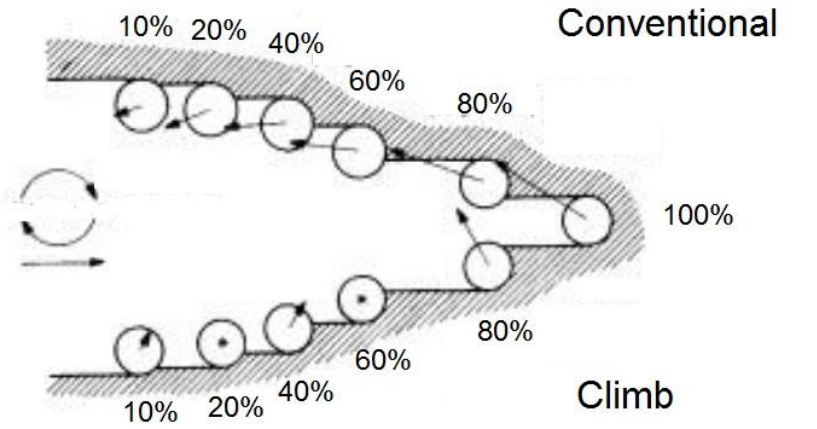
اسپیندل ماشین‌های سی‌ان‌سی توسط موتورهایی به دوران در می‌آید که دست‌کم 7 اسب بخار نیرو دارند. این انرژی فوق‌العاده زیاد باید به واسطهٔ فرز به قطعهٔ کار منتقل گردد. با نگاهی خوشبینانه مقدار زیادی از این نیرو صرف برش قطعهٔ کار می‌شود و از طریق ایجاد سفاله آزاد می‌گردد. اما در هر حال بخشی از آن به شکل‌هایی درمی‌آید که مدنظر ما نیستند: تولید حرارت، بروز تنش در قطعهٔ کار، ایجاد لرزش در فرز و نهایتاً خمیدگی ابزار[1]. مورد آخری از لحاظ تلرانس‌های ماشین‌کاری بسیار مهم است. مخصوصاً اگر قطر فرز کم باشد مسالهٔ خمش بحرانی‌تر می‌شود.

تعیین‌کننده‌ترین عامل خمش همانا مقدار استپ‌اورهای ماشین‌کاری است: به طور کلی هرچه گوشت برش بیشتر باشد میزان خمیدگی ابزار افزایش خواهد یافت. به همین دلیل است که در هنگام پرداخت نهایی و سایز کردن اجزای قطعهٔ کار باید گوشت برش کم باشد.

اما در این مورد هم نباید ساده‌انگارانه رفتار کرد. زیرا به جز میزان خمش جهت آن هم اهمیت دارد. سمت‌وسوی خم شدن فرز توسط برهم‌کنش دو عامل تعیین می‌شود: اولاً میزان درگیری قطر ابزار و ثانیاً نوع باربرداری موافق (climb) یا مخالف (conventional). همه می‌دانیم که باردهی موافق و مخالف بر صافی سطح تأثیر می‌گذارد. اما تأثیر آن بر تلرانس‌های ابعادی بسیار مهم‌تر است و باید با دقت بیشتری مورد مطالعه قرار گیرد. برای سهولت کارمان کلیت بحث را به صورت شماتیک در شکل صفحهٔ بعد می‌آوریم. بردارهایی که در این شکل می‌بینید

[1] Tool Deflection

جهت خمیدگی فرز و میزان نیروی وارده را به ازای درصد درگیری قطر فرز نمایش می‌دهند. ملاحظه می‌کنید که خمش در بعضی حالات به صورت پس‌زنی نمودار می‌شود و در بعضی حالات به صورت درون‌کشی درمی‌آید. گفتن ندارد که تأثیر درون‌کشی و پس‌زنی بر تلرانس‌های ابعادی سرتاپا متفاوت است.



شکل فوق حاوی چه نکاتی برای ماشین‌کاری است؟ در حالتی که درگیری فرز و قطعهٔ کار پایین باشد بار مخالف (Conventional) مطمئناً گزینهٔ مطلوب‌تری برای رعایت تلرانس‌هاست؛ زیرا جهت خمیدگی ابزار در این حالت تقریباً موازی مسیر برش خواهد بود و احتمال به‌هم‌خوردن ابعاد کار پایین خواهد آمد. از سوی دیگر انتخاب بار موافق (Climb) برای خشن‌کاری گزینهٔ مناسبی است. زیرا در این حالت انتهای تراشه نازک‌تر در می‌آید و فرز مجبور نمی‌شود برای کندن و جدا کردن سفاله‌های درشت از گوشت کار فشار فراوانی را

تحمل کند. این روش مخصوصاً روی فلزات سختی مثل استیل کارگشاست و می‌تواند سرعت خشن‌کاری را بدون خطر شکستن فرز به نحو چشمگیری افزایش دهد.

البته اگر صافی سطح فوق‌العاده مهم باشد چاره‌ای جز این نیست که مرحلهٔ پرداخت را با بار موافق انجام دهید. در این حالت باید اندازهٔ قطر فرز و میزان بیرون‌زدگی از فشنگی را طوری تنظیم کنید که مسألهٔ خمیدگی دردسرساز نشود. می‌توان این تنظیمات را با فرایند فرسایندهٔ آزمایش و خطا کشف کرد. یعنی هزاران بار ماشین‌کاری دچار خطا برای دست یافتن به یک دانش تجربی مختصر و غیرقطعی. البته می‌توانید فرایند آزمایش و خطا را با تکیه به قوانین و قواعد کلی اندکی ساده‌تر کنید. گفتیم که مهم‌ترین عامل تعیین‌کنندهٔ خمیدگی همانا اندازهٔ گوشت برش است. وقتی پای رعایت تلرانس‌های ابعادی در میان باشد باید در حالت بار مخالف کمتر از 30 درصد قطر فرز و در حالت بار موافق کمتر از 5 درصد قطر فرز با قطعهٔ کار درگیر شود. این راهنمایی کلی بدک نیست ولی نمی‌توان در همه حال به آن اتکا کرد. عوامل بسیار بیشتری در این بین دخیل‌اند: عمق برش، مقدار بیرون‌زدگی، تعداد پره‌ها، زاویهٔ مارپیچ، مقدار پیشروی و سرعت و نهایتاً جنس فرز (برای مثال صلبیت کارباید 3 برابر «HSS» است).

راه‌حل قطعی و سادهٔ معضل فوق استفاده از برنامه‌های محاسباتی سرعت و پیشروی است. برای مثال با نرم‌افزار «G-wizard» می‌توان دقیقاً محاسبه کرد که میزان خمش به ازای تغییر تک‌تک متغیرهای فوق چقدر است و آیا با وجود این مقدار خمش در محدودهٔ تلرانس مجاز باقی می‌مانید یا نه؟

این محاسبات دقیق از نقطه نظر طول عمر ابزار نیز مهم‌اند. خمش ابزار خواه‌ناخواه موجب لرزش آن می‌شود؛ هر بار که لبهٔ تیز می‌خواهد به دل گوشت برش بزند کمی منحرف می‌شود و

پس از کندن سفاله دوباره به سر جایش برمی‌گردد. در نظر داشته باشید تکرار دوباره و دوبارهٔ این فرایند در سرعت 7000 دور دقیقه چه آسیبی به لبه‌های تیز فرز می‌زند! برای آنکه بتوانید به حداکثر عمر مندرج در کاتالوگ برسید لازم است خمش فرز پایین‌تر از 0.025 میلیمتر باشد (می‌شود خمیدگی بیش از حد مجاز را از روی صدای زنگوله‌مانند فرز تشخیص داد).

با نرم‌افزارهایی مانند «G-wizard» می‌توان علاوه بر محاسبهٔ سرعت و پیشروی مقدار مطلوب عمق و گوشت برش را هم محاسبه کرد. اجازه دهید ببینیم شیوهٔ درست به‌کارگیری این تنظیمات چگونه است؟

پیش از هر چیز باید عملیات ماشین‌کاری را به دو سنخ متمایز تقسیم کرد: شیارزنی[2] و پاکت‌زنی[3]. منظور از شیارزنی هرگونه عملیات فرزکاری است که منجر به ایجاد حفره‌ای برابر با قطر فرز (یا کمی بزرگ‌تر از قطر فرز) می‌شود. به بیان دقیق‌تر شیارزنی شامل انواع سوراخ‌ها و چاک‌هایی می‌شود که فرز در داخل آن‌ها فضای خالی زیادی برای حرکت در اختیار ندارد. اگر فضای خالی داخلی زیاد باشد عملیات ماشین‌کاری را پاکت‌زنی می‌نامیم (به طور معمول عملیات خشن‌کاری تحت شرایط شیارزنی و عملیات پرداخت تحت شرایط پاکت‌زنی انجام می‌شود). در هر یک از این حالات یکی از دو متغیر فوق اهمیت بیشتری می‌یابد. در شیارزنی باید اولویت را به تعیین گوشت برش داد؛ زیرا دست‌مان در این مورد باز نیست و باید از محدودیت‌های واقعی کار تبعیت کنیم. اما در پاکت‌زنی می‌توان اولویت را به عمق برش داد و گوشت برش را بر اساس آن تعیین کرد.

[2] Slotting
[3] Pocketting

باید توجه داشت که در مرحلهٔ پرداخت هر چه تعداد لایه‌های برداشتنی کمتر باشد کیفیت و سرعت کار افزایش می‌یابد. پس بهتر است تمام محاسبات را قبل از آغاز عملیات انجام دهید. به این ترتیب می‌توانید باربرداری خشن‌کاری را طوری انجام دهید که گوشت باقی‌مانده برای مرحلهٔ پرداخت برابر با اندازهٔ مطلوب باشد و بتوان آن را در یک مرحله ماشین‌کاری کرد. با این توضیحات می‌توان تنظیمات باردهی را به کمک نرم‌افزار «G-wizard» به سادگی انجام داد: نخست بر طبق شناختی که از کارتان دارید عمق برش مناسب پرداخت‌کاری را وارد کنید تا به گوشت برش بهینهٔ پرداخت‌کاری برسید. سپس بر طبق عدد به دست آمده می‌توانید گوشت برش خشن‌کاری را به نرم‌افزار بدهید تا به عمق برش بهینهٔ خشن‌کاری برسید.

برای مثال فرض کنید می‌خواهیم در آلومنیوم 6061 پاکتی به قطر 10 میلیمتر و عمق 1.5 میلیمتر بزنیم که «R» گوشه‌های آن 0.7 است. برای پرداخت این پاکت از یک فرزی چهارپر کارباید به شعاع نیم میلیمتر (قطر یک میلیمتر) استفاده می‌کنیم. قصدمان این است که کل دیواره را با یک برش تمام کنیم. پس عمق برش برابر با 1.5 میلیمتر خواهد بود. در حالتی که بیرون‌زدگی ابزار 2 میلیمتر باشد رقم بهینهٔ گوشت برش برای پرداخت با بار موافق 0.12 میلیمتر محاسبه خواهد شد (با پیش‌فرض 0.02 میلیمتر خمش مجاز). حال باید میزان درگیری فرز 8 میلیمتری سه‌پر خشن‌کاری را طوری تنظیم کنیم که پس از پایان کارش تقریباً 0.12 میلیمتر گوشت روی دیواره‌ها باقی بماند. یک محاسبهٔ سرانگشتی نشان می‌دهد باید 4.88 میلیمتر (61 درصد قطر فرز) درگیر خشن‌کاری شود. در این حالت رقم بهینهٔ عمق برش در نرم‌افزار برابر با 0.85 میلیمتر (با فرض 0.02 میلیمتر خمش مجاز) محاسبه می‌شود. در مرحلهٔ بعد می‌توان با تکیه بر این اعداد پیشروی و سرعت طلایی را برای هر دو

فرز محاسبه کرد. البته لازم است Rها هم جداگانه خشن‌کاری شوند تا گوشت اضافه‌ای روی آن‌ها باقی نماند.

شاید بپرسید که رعایت دغدغهٔ خمش ابزار در مرحلهٔ خشن‌کاری چه دلیل دارد؟ آیا این کار وسواسی نیست؟ پاسخ منفی است. حتی در مرحلهٔ خشن‌کاری هم نباید اجازه داد خمش ابزار از حد معینی فراتر برود. در غیر این صورت گوشت بسیار بیشتری روی دیواره‌ها باقی می‌ماند و ممکن است باعث شود فرز ظریف‌تان در مرحلهٔ پرداخت نهایی بشکند. ماشین‌کارها به خوبی می‌دانند که شکستن فرز در مرحلهٔ پرداخت نهایی چه فاجعه‌ای است!

این مطلب را خلاصه‌وار مرور کنیم:

1- مشخص کنید که عملیات جاری جزو کدام یک از دو دستهٔ شیارزنی و پاکت‌زنی است.
2- در حالت پاکت‌زنی ابتدا راجع به باردهی موافق یا مخالف تصمیم بگیرید. سپس عمق برش را تعیین کنید و محاسبهٔ گوشت برش بهینه را به نرم‌افزار واگذار نمایید.
3- در حالت شیارزنی ترجیحاً از بار موافق استفاده کنید. ابتدا خودتان گوشت برش را بر طبق محاسبات قبلی تعیین نمایید و محاسبهٔ عمق برش بهینه را به عهدهٔ نرم‌افزار بگذارید.

بدین روش می‌توانید ضمن حداقل‌سازی خمش ابزار به حداکثر براده‌برداری و حداکثر عمر ابزار برسید.

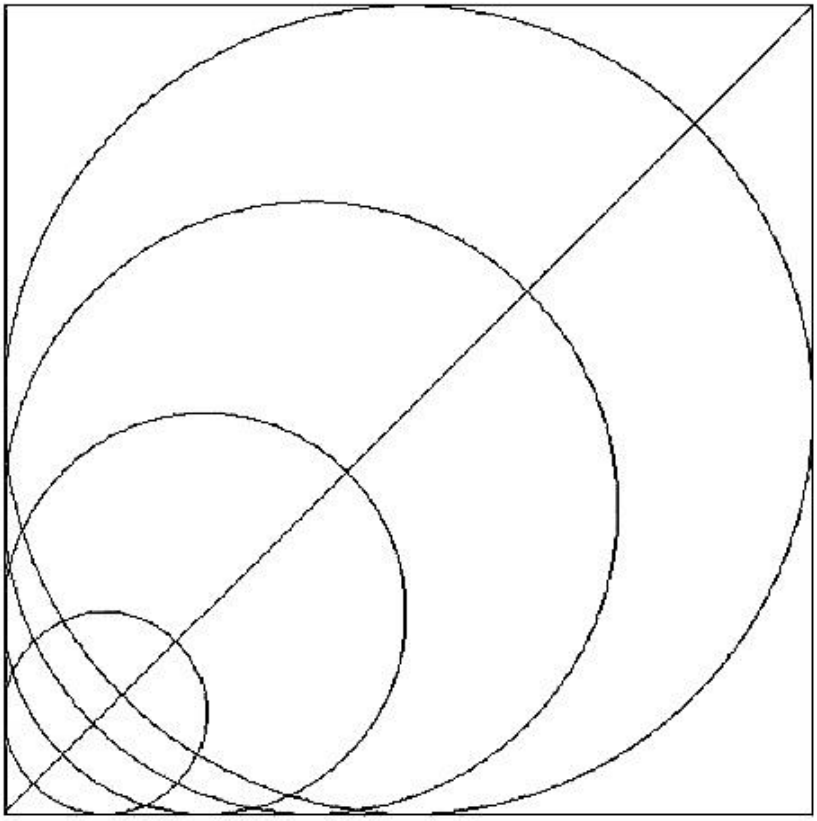
ضروریات مسیر ابزار در ماشین‌کاری فوق‌سریع

لحظهٔ ورود ابزار به قطعه حساس‌ترین مرحلهٔ ماشین‌کاری است و می‌تواند موجب آسیب دیدن فرز شود. لازم است که مسیر ورود ابزار به صورت منحنی باشد نه یک خط مستقیم. اگر ناچارید در خطی مستقیم وارد قطعهٔ کار شوید باید با کناره‌های فرز این کار را انجام دهید نه با مرکز آن. اگر این هم ممکن نبود سعی کنید نرخ پیشروی را در لحظهٔ ورود نصف کنید. به هر میزان که جنس قطعهٔ کار سخت‌تر باشد شما هم باید در این مورد سخت‌گیرانه‌تر برخورد کنید.

نظر به بحرانی بودن لحظهٔ ورود عاقلانه‌تر آن است که سعی کنید ابزارتان هر چه کمتر از دل قطعه خارج شود. به جای آنکه فرز را مجبور کنید دوباره و دوباره وارد کار شود سعی کنید آن را در حالت درگیری با قطعه نگه دارید.

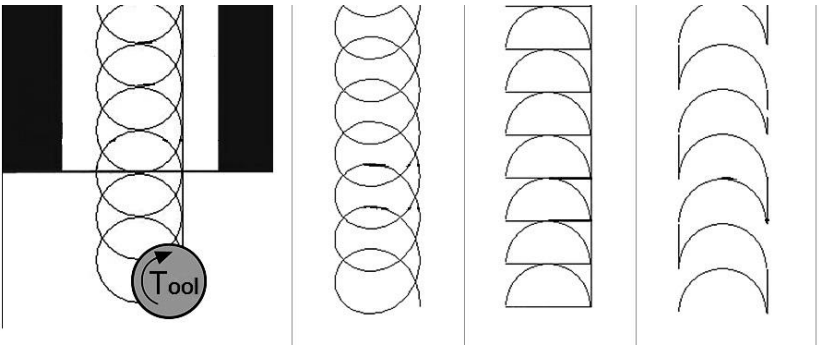
دومین نکتهٔ مهم در بحث مسیر ابزار مسألهٔ کنج‌های داخلی قطعهٔ کار است. سعی کنید شعاع ابزارتان همواره کمتر از «R» گوشه‌ها باشد. برابری شعاع ابزار و «R» داخلی قطعه می‌تواند به سادگی به شکستن فرز منجر شود. زیرا در این شرایط میزان درگیری قطر ابزار به ناگاه در کنج‌ها افزایش می‌یابد و در چشم برهم‌زدنی فشار وارده بر فرز اوج می‌گیرد. چنین تنشی می‌تواند به اندازهٔ تنش لحظهٔ ورود خطرناک باشد. علاوه بر رعایت ملاحظهٔ فوق سعی کنید نرخ پیشروی در گوشه‌های کار پایین بیاید. اما چطور است به جای کاهش پیشروی ترفندی بزنید که مسیر ابزار حاوی هیچ کنج و گوشه‌ای نباشد؟ مسیر ابزارهای «HSM» (ماشین‌کاری فوق‌سریع) چنین ویژگی‌ای دارند. این تکنیک در منابع مختلف

«پوست‌اندازی»[1] و «فرزکاری فرفره‌ای»[2] نامیده شده است. در این تکنیک فرز به جای آنکه به‌یکباره به دل کنج‌ها بزند آن‌ها را لایه‌لایه برمی‌دارد. بدین منظور باید مجموعه‌ای از مسیر ابزارهای دایره‌ای شکل بگیرند که مطابق شکل زیر کنج‌های تیز را خالی کنند.



[1] Peeling
[2] Trochoidal milling

فرزکاری فرفره‌ای برای شیارزنی هم کاربرد دارد. فرض کنید می‌خواهید یک شیار را با فرزی بزنید که قطر آن تقریباً هم‌اندازهٔ عرض شیار است. واضح است که در این حالت مجبورید نرخ پیشروی را به شدت پایین بیاورید. اما اگر این کار را با فرزی کوچک‌تر انجام دهید و مسیر برش را طوری تنظیم کنید که انگار روی بال یک فرفره جلو می‌رود می‌توانید نرخ پیشروی را به طرز قابل ملاحظه‌ای افزایش دهید. شکل زیر یک مسیر ابزار فرفره‌ای و نسخهٔ بهینه‌شدهٔ آن را برای زدن یک شیار نشان می‌دهد.



استفاده از این تکنیک روی فلزات سخت بسیار راهگشاست اما اگر نمی‌توانید طول زیادی از فرزتان را درگیر کنید بهتر است به روش‌های سنتی برگردید. با توجه به درگیری طول فرز و عمق برش زیاد در این روش باید از فرزهای کارباید چهارپر به بالا استفاده کنید که قطر مغزی‌شان بیشتر است و صلبیت بیشتری دارند. همچنین زاویهٔ مارپیچ فرز باید زیاد باشد تا بتواند به خوبی در برابر فشارهای جانبی مقاومت کنند.